

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源

韩丽花^{1,2,3}, 徐笠^{1,2*}, 李巧玲³, 陆安祥^{1,2}, 殷敬伟^{1,2}, 田佳宇^{1,2}

(1. 北京市农林科学院, 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097; 2. 农产品产地环境监测北京市重点实验室, 北京 100097; 3. 中北大学理学院, 太原 030051)

摘要: 以辽河流域为研究对象, 基于密度浮选原理, 结合体视显微镜及显微红外光谱(μ -FTIR), 对辽河流域土壤中微(中)塑料的形貌、丰度及分布特征进行了系统地研究, 并合理推测了影响微(中)塑料分布的主要因素及潜在来源。结果表明, 土壤微(中)塑料平均丰度为 $(145.83 \pm 211.46) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。微(中)塑料以碎片(46.00%)、 $<1000 \mu\text{m}$ (39.57%)、聚丙烯(PP) (41.71%) 和白色(46.86%) 为主。其中, 聚乙烯(PE)主要形状是薄膜和碎片(96.91%), PP 主要形状是碎片(85.62%), 聚苯乙烯(PS)主要形状是泡沫, 人造丝(Rayon)、聚酯纤维(PES)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)微(中)塑料以纤维状为主($>85\%$)。工业活动(快递公司、塑料厂、服装厂)、农业活动(地膜覆盖、污水灌溉、污泥堆肥)、人口密度和污水处理厂等可能会导致土壤中微(中)塑料丰度的较高水平。污水排放及其灌溉、塑料制品(农药瓶、化肥包装袋、塑料农膜、编织袋等)和用于装饰、包装、运输的泡沫材料等是辽河流域土壤中微(中)塑料的潜在来源。

关键词: 微(中)塑料; 辽河流域; 土壤; 污染特征; 潜在来源

中图分类号: X52; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1781-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202006186

Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro (meso) plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin

HAN Li-hua^{1,2,3}, XU Li^{1,2*}, LI Qiao-ling³, LU An-xiang^{1,2}, YIN Jing-wei^{1,2}, TIAN Jia-yu^{1,2}

(1. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. Beijing Municipal Key Laboratory of Agricultural Environment Monitoring, Beijing 100097, China; 3. School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: With the Liaohe River basin as the research object, the morphology, abundance, and distribution characteristics of micro (meso) plastics of soil in Liaohe River basin were studied based on the density flotation principle and the technique of stereo microscope and micro-FTIR and the significant factors affecting the distribution of the micro(meso)plastics and their potential sources were reasonably speculated. The results indicated that the average abundance of the soil micro(meso)plastic is $(145.83 \pm 211.46) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$. The most abundant types of micro(meso)plastics are debris (46.00%), $<1000 \mu\text{m}$ (39.57%), PP (41.71%), and white (46.86%). Among them, Rayon, PES, and PET micro(meso)plastics are primarily in the shape of fibrous ($>85\%$), PE is mostly in the shape of film and fragments (96.91%), PP is mainly in the shape of fragments (85.62%), and PS is primarily in the shape of foam. Industrial activities (express delivery companies, plastic factories, and clothing factories), agricultural activities (plastic mulch, sewage irrigation, and sludge composting), population density, and sewage treatment plants, etc., may lead to higher levels of micro(meso)plastic abundance in the soil of the study area. Plastic products (pesticide bottles, chemical fertilizer packaging bags, woven bags, and plastic agricultural films), sewage discharge and irrigation, and foam materials used for packaging and decoration are the potential sources of soil micro(meso)plastic in the region.

Key words: micro(meso)plastic; Liaohe River basin; soil; pollution characteristics; potential sources

近年来,微塑料因其来源广、难降解、粒径小以及具有毒性效应等特点,受到国内外各界的广泛关注^[1]。微塑料可通过摄食等途径在不同营养级的微生物体内累积,改变生物的新陈代谢,引发各种生物效应,如免疫反应、神经毒性、基因毒性及炎症反应等^[2],对生物多样性、生态系统服务和人类健康构成潜在的威胁^[3]。此外,微塑料还可以作为环境中化学物质的载体,将环境中的微生物和各种污染物富集至其表面^[4],产生复合污染效应。国内外已有研究表明,微塑料广泛分布于海洋、河流、湖泊、淡水生物和土壤等中^[5,6]。目前关于微塑料的研究大都集中在水生生态系统,陆地生态系统中微塑料的研

究相对较少^[7~10]。

辽河流域是东北工农业生产的重要基地,也是污染最严重的流域之一^[11]。关于辽河流域的研究多集中于有机污染物^[12]、重金属^[13]及氨氮^[14]等污染物。目前,辽河流域中土壤微(中)塑料的丰度和空间分布未有报道。近期一些研究表明,陆地可能是比海洋更大的塑料储藏库,其微塑料丰度可能是海洋

收稿日期: 2020-06-18; 修订日期: 2020-09-14

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601003); 北京市优秀青年骨干项目; 北京市农林科学院创新能力建设项目(KJ CX20180406)

作者简介: 韩丽花(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为微塑料的环境行为, E-mail: lihuaHanzbxdx@163.com

* 通信作者, E-mail: xuliforever@163.com

的 4~23 倍^[15]. 因此,陆地微塑料作为海洋和淡水微塑料的主要来源,其问题已不容小觑^[16]. 本文以辽河流域为研究对象,对土壤中微(中)塑料的空间分布、丰度、颜色、粒径和成分等情况进行初步调查和鉴定;通过分析不同采样点、不同土壤类型对微(中)塑料的丰度和分布的影响,进一步明确辽河流域土壤微(中)塑料的分布特征、潜在来源与主要影响因素,以期进一步补充我国在内陆陆地生态系统特别是渤海上游流域土壤微(中)塑料污染研究方面的基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样点布设

辽河流域(40°47′~43°02′N, 121°41′~123°55.5′E)北向南流经辽宁省中部的铁岭、沈阳、鞍山和盘锦这4个市的14个县(区)^[17],属温带半湿润大陆性季风气候. 该区域多年平均降水量为400~1 000 mm,主汛期一般在7~8月,占全年降水量的50%以上^[18]. 以均匀分布为原则,结合样点的代表性和采集难易程度,本文共设置32个采样点(图1). 从北向南对辽河干流及其部分支流(饶阳河、柳河、公河、招苏台河、清河、柴河、汎河、秀水河和养息牧河)沿岸的表层土壤进行采集. 4个城市中,铁岭市布点11个,沈阳市布点15个,盘锦市布点4个,鞍山市布点2个. 土壤分为7类:林地、草地、灌木、玉米地、荒地、蔬菜地和芦苇地. 在所有采样点中,L01、L02、L04及L11为林地,采样点L03、L05、L06、L14、L15、L22、L24、L29及L32为草地,采样点L07及L08为灌木地,采样点L09、L12、L16~L21、L25、L28及L31为玉米地,L30为芦苇地,L23为蔬菜地,L10、L13、L26及L27为荒地.

1.2 采样与分析

1.2.1 样品采集

采用“五点采样法”,用不锈钢铲采集32个样地表层(0~5 cm)土壤,将采集好的土壤过筛孔径为5 mm的不锈钢标准筛,去除>5 mm的树枝、石头等大型垃圾. 用铝箔包好装入自封袋密封保存^[19],做好标记后带回实验室,放置于4℃的冰箱内保存. 记录每个采样点的地理位置、土壤类型及附近环境特征.

1.2.2 分离提取方法

基于Thompson等^[20]的密度分离原理,采用文献[21,22]中较为常用的饱和氯化锌(ZnCl_2)溶液进行土壤微(中)塑料的浮选分离. 为了保证土壤中微(中)塑料的提取效率,土壤中的密度浮选步骤重复3次. 每份土壤取干重为50 g的样品进行研究,

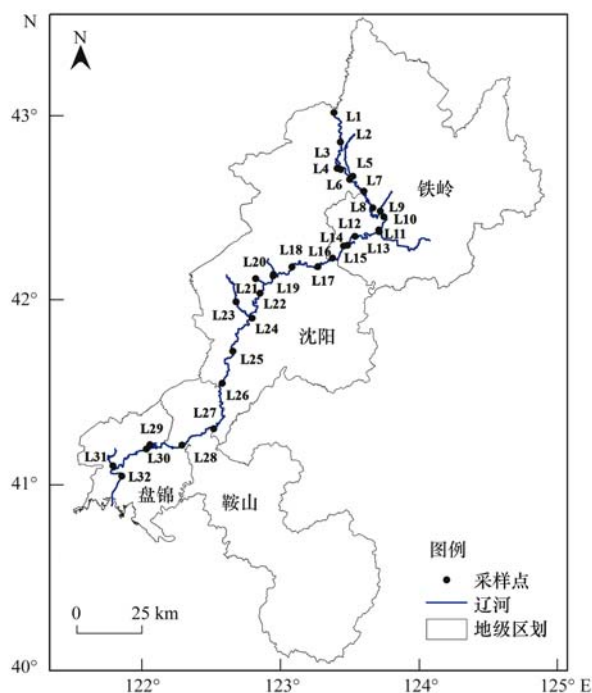


图1 辽河流域采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points in the Liaohe River basin

并设置3个平行,具体步骤参考韩丽花等的研究^[23].

1.2.3 镜检及光谱鉴定方法

参考已有的多数研究,主要对微(中)塑料的粒径、形状、颜色以及聚合物类型进行分类及鉴定. 粒径分为6个区间:<1 000、1 000~2 000、2 000~3 000、3 000~4 000、4 000~5 000及5 000~20 000 μm ^[24];形状分为5个类型:纤维、碎片、颗粒、薄膜和泡沫^[25~27]. 颜色主要有以下9种:蓝色、黑色、黄色、白色、红色、绿色、彩色、透明及紫色. 微塑料的类型通过傅里叶变换红外光谱进行测定,工作条件参考韩丽花等的研究^[23]. 考虑到土壤微(中)塑料侵蚀情况,计算匹配因子阈值为0.60^[12]. 对达到匹配因子阈值的样品进行计数,鉴定结果统计为微(中)塑料丰度.

1.3 数据统计与处理

本研究数据处理使用Excel完成;数据统计分析用SPSS 22.0 (SPSS, Inc., Chicago, IL, USA),各土壤样品中的微(中)塑料丰度的差异使用非参数检验Kruskal-Wallis H 进行分析;并利用Mann-Whitney U 检验对数据进行两两分析;作图使用OMNIC 8.0及Origin Pro 9.0.

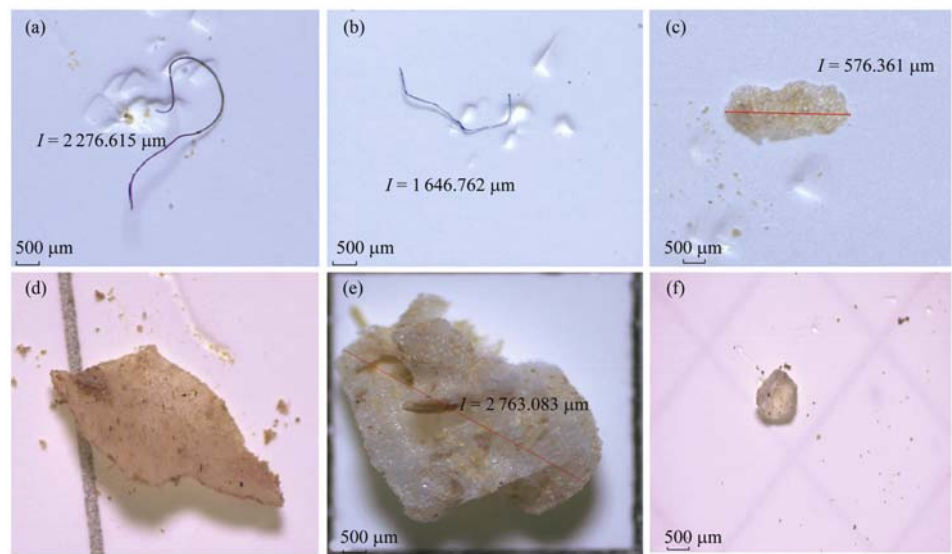
2 结果与分析

2.1 微(中)塑料的丰度与分布

辽河流域土壤内的微(中)塑料形态不同,大小不一,颜色各异,典型的微(中)塑料样品在体式显微镜下的照片如图2所示. 土壤样品中微(中)塑料

的检出率为 100% (图 3),所有样品中共分离出 700 个微(中)塑料粒子. 土壤中微(中)塑料的平均丰度为 $(145.83 \pm 211.46) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,丰度范围在 $(13.33 \pm 11.55) \sim (886.67 \pm 133.17) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间. 其中,采样点 L27 的微(中)塑料丰度最高 $[(886.67 \pm 133.17) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$,该点位于鞍山市台安县,丰度最低的采样点是 L12 $[(13.33 \pm 11.55) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$. 所有采样点的微(中)塑料丰度之间存在显著性差异($P < 0.05$),且采样点 L27 微(中)塑料丰度显著高于

其他采样点 ($P < 0.05$). 该区域各类型土壤中微(中)塑料的平均丰度的变化范围是 $(66.67 \pm 16.33) \sim (320 \pm 371.34) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 4). 其中,丰度大小依次为荒地 $[(320 \pm 371.34) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}] >$ 玉米地 $[(141.21 \pm 160.7) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}] >$ 草地 $[(133.33 \pm 29.73) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}] >$ 芦苇地 $[(106.67 \pm 30.55) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}] >$ 蔬菜地 $[(100 \pm 34.64) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}] >$ 林地 $[(73.33 \pm 29.95) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}] >$ 灌木地 $[(66.67 \pm 16.33) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$.



放大倍数: $\times 20$, I 表示粒径; (a) 和 (b) 纤维类; (c) 薄膜类; (d) 碎片类; (e) 泡沫类; (f) 颗粒类

图 2 典型环境微(中)塑料的镜检

Fig. 2 Microscopic examination of micro(meso)plastics in a typical environment

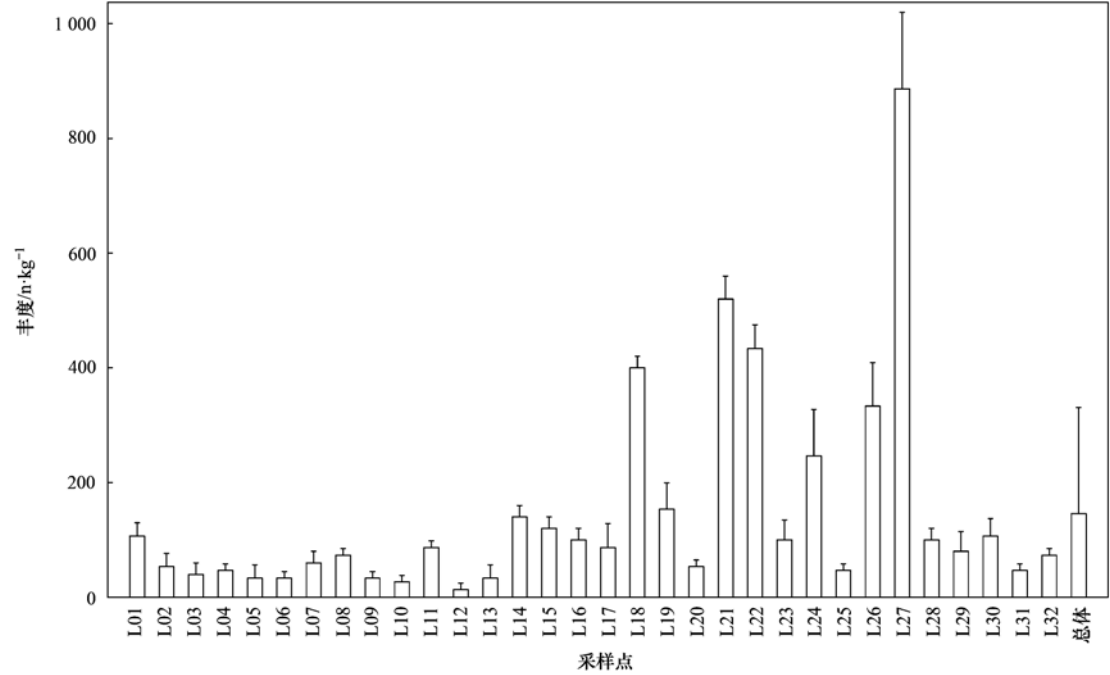


图 3 样品中微(中)塑料的丰度与分布

Fig. 3 Abundance and distribution of micro(meso)plastics in the samples

2.2 微(中)塑料的形貌特征(形状、粒径及颜色)
土壤中微(中)塑料的粒径最小值为 88 μm ,如

图 5 所示. 其中,土壤中微塑料($< 5000 \mu\text{m}$)的比例为 99.57%,中塑料的数量远远低于微塑料的

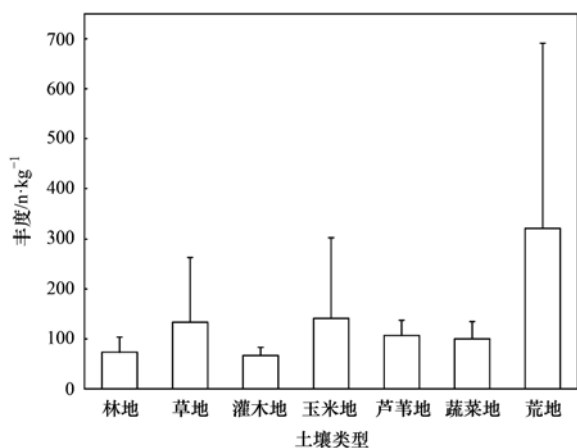


图4 不同土壤类型中微(中)塑料的丰度与分布

Fig. 4 Abundance and distribution of micro(meso) plastics in different soil types

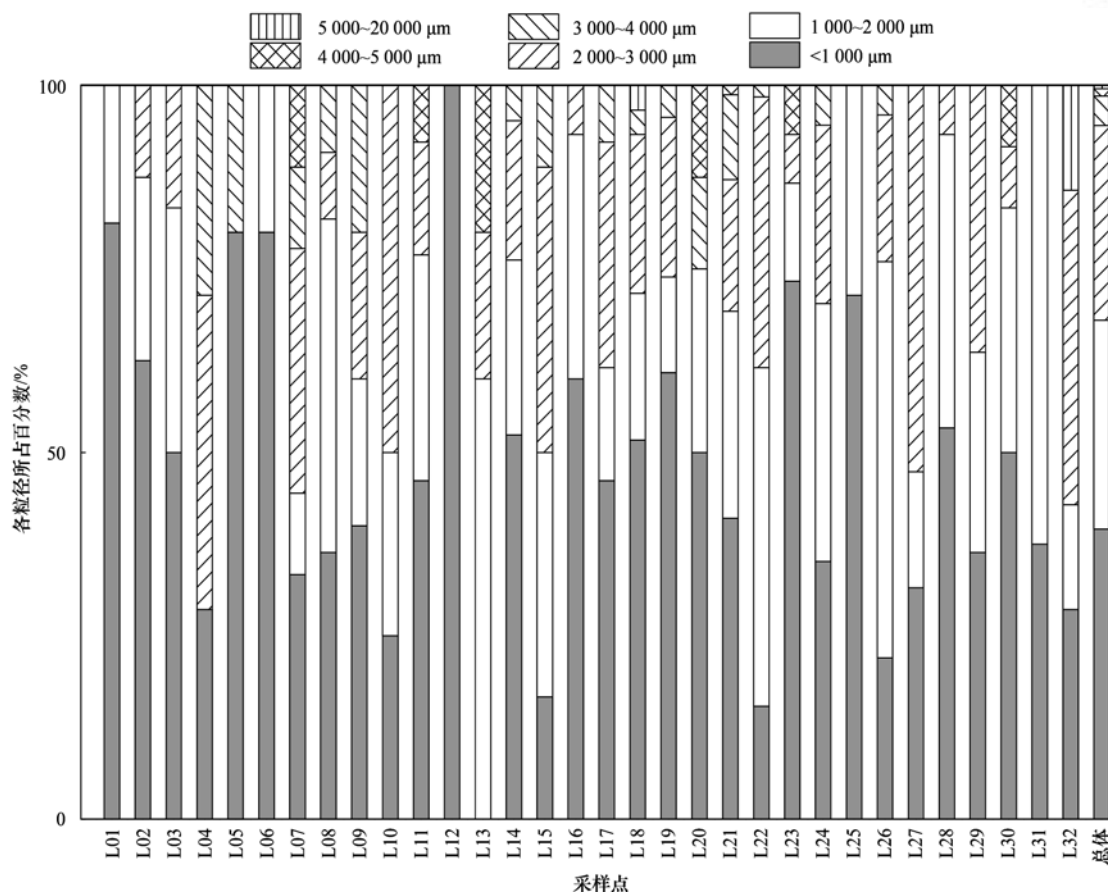


图5 样品中微(中)塑料的粒径分布

Fig. 5 Particle size distribution of micro(meso) plastics in the samples

颗粒状微(中)塑料丰度最高($340 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$), 采样点 L27 碎片状和纤维状微(中)塑料较多, 丰度分别为 $2\,160 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $300 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$. 就颜色而言(图7), 有4种颜色(白、黑、黄和蓝色)占比超过10%, 其中白色微(中)塑料占比最高(46.86%).

2.3 微(中)塑料的组成成分

通过显微傅里叶红外光谱仪(μ -FTIR)鉴定微(中)塑料的主要成分. 在所有可疑样品中, 共检测

数量. 整体来看, 土壤中微塑料丰度遵循粒径越大, 比例越小的规律. 不同尺寸微(中)塑料所占比例顺序依次为: $<1\,000 \mu\text{m}$ (39.57%) $>1\,000 \sim 2\,000 \mu\text{m}$ (28.43%) $>2\,000 \sim 3\,000 \mu\text{m}$ (26.57%) $>3\,000 \sim 4\,000 \mu\text{m}$ (4.00%) $>4\,000 \sim 5\,000 \mu\text{m}$ (1.00%) $>5\,000 \sim 20\,000 \mu\text{m}$ (0.43%).

样品中观测到的微(中)塑料形状有薄膜、碎片、纤维、颗粒和泡沫这5种(图6). 微(中)塑料中碎片所占比例最高(46.00%), 纤维和薄膜占比分别为30.14%及16.57%, 而泡沫类和颗粒类占比分别为3.43%和3.86%. 另外, 不同采样点微(中)塑料的形状和数量也差异很大. 采样点 L22 泡沫状微(中)塑料数量最多($140 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$), 采样点 L26 中薄膜状微(中)塑料最多($680 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$), 采样点 L18

出27种不同类型. 各聚合物类型的微(中)塑料中英文名称、英文缩写及占比如表1所示. 结果表明, 聚丙烯(polypropylene, PP)占比最高(41.71%), 其后依次为人造丝(rayon, RY, 21.14%)、聚乙烯(polyethylene, PE, 13.86%)、聚酯纤维(polyester, PES, 5.00%)、聚对苯二甲酸乙二酯[poly(ethylene terephthalate), PET, 3.00%]和聚苯乙烯(polystyrene, PS, 3.00%). 其余的聚合物类型占比

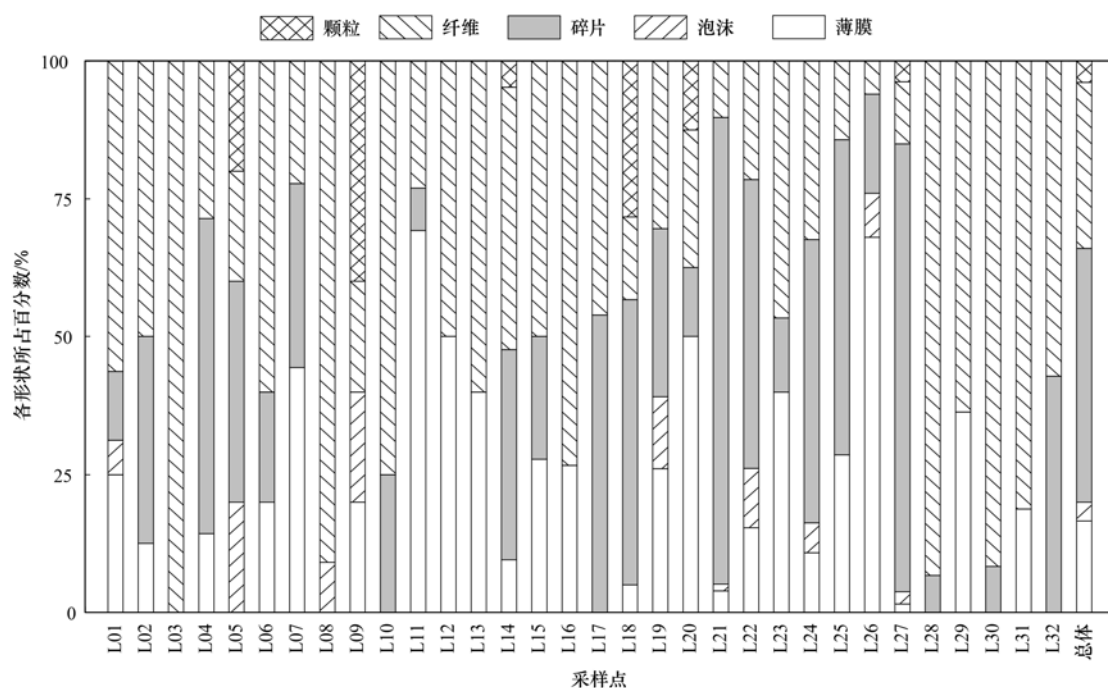


图6 样品中微(中)塑料的形状分布

Fig. 6 Shape distribution of micro(meso)plastics in the samples

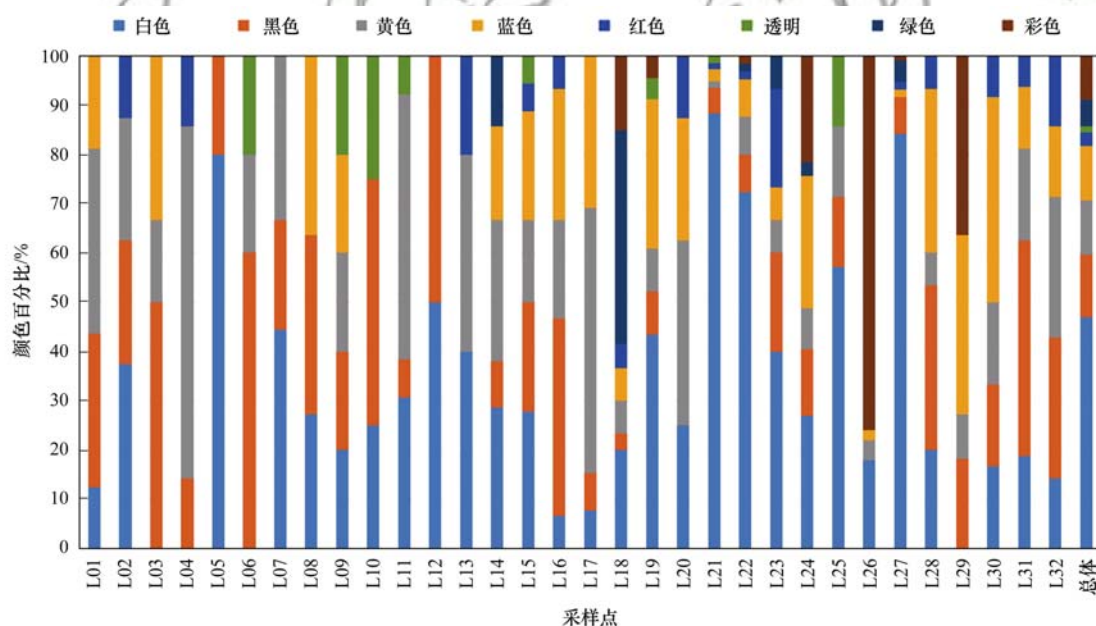


图7 样品中微(中)塑料的颜色分布

Fig. 7 Color distribution of micro(meso)plastics in the samples

均低于 3.00%, 有一半左右的采样点检测出了 PP、PE、PET 和 PS 微(中)塑料。PE 和 PP 两种成分分别在采样点 L26 和 L21 中占比较高, 为 84.00% 和 84.62%。PET 在采样点 L06 中占比最高, 为 40.00%, PES 在采样点 L13 中占比最高, 为 60.00%, 而 RY 在采样点 L03 中占比最高, 为 100%。就土壤类型而言, PE 在蔬菜地占比最高(40.00%), PP 在玉米地和荒地占比较高(57.28%), RY 在芦苇地占比较高(75.00%), PES 在灌木地占比较高

(20.00%)。研究区域环境样品中典型微(中)塑料及对应标准品的红外光谱如图 8 所示。聚乙烯的主要红外特征峰是亚甲基($-\text{CH}_2-$), 聚酰胺的主要红外特征峰是酰胺基($-\text{CO}-\text{NH}-$)和亚甲基链($-\text{CH}_2-$), 聚丙烯的主要红外特征峰是甲基($-\text{CH}_3$)和亚甲基($-\text{CH}_2-$), 聚对苯二甲酸乙二酯的主要红外特征峰是羰基($\text{C}=\text{O}$)和 $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$, 聚苯乙烯的主要红外特征峰是 $\text{C}=\text{C}$ 和 $-\text{CH}_2$ 。

表 1 土壤中微(中)塑料聚合物类型
Table 1 Polymer types of micro(meso)plastics in the soil

中文名称	英文名称	英文缩写	数量占比/%
聚丙烯	polypropylene	PP	41.71
人造丝	rayon	RY	21.14
聚乙烯	polyethylene	PE	13.86
聚酯纤维(涤纶)	polyester	PES	5.00
聚(丙烯酸十八醇酯)	poly(octadecyl acrylate)	POA	4.86
聚苯乙烯	polystyrene	PS	3.00
聚对苯二甲酸乙二醇酯	poly(ethylene terephthalate)	PET	3.00
苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物	styrene-Butadiene-Styrene	SBS	1.29
聚酰胺	polyamide	PA	1.00
聚丙烯腈	polyacrylonitrile	PAN	0.71
聚(N-甲基丙烯酰胺)	poly(N-methyl acrylamide)	PNMAA	0.57
聚衣康酸二环庚酯	poly(dicycloheptyl itaconate)	PIDC	0.57
聚 11-溴代十一烷丙烯酸酯	poly(11-bromoundecyl acrylate)	PBMA	0.43
聚乙烯醇	polyvinylalcohol	PVA	0.43
聚丙烯酰胺	polyacrylamide	PAM	0.29
聚(乙烯;4-甲基-1-戊烯)	poly(ethylene;4-methyl-1-pentene)	PE/PMP	0.29
聚酰胺-胺,二聚脂肪酸	polyamide-amine, dimer fatty acids	PAA,DFA	0.29
聚(苯乙烯;丙烯腈), 77 mol% 苯乙烯	poly(styrene;acrylonitrile), 77 mol% styrene	PS/PAN	0.29
聚醋酸烯丙酯	polyallyl acetate	PAAC	0.14
聚碳酸酯	polycarbonate	PC	0.14
脲-甲醛树脂	urea-formaldehyde resin	UF	0.14
聚氨酯	polyether urethane	PEU	0.14
聚(4-甲基己内酰胺)	poly(4-methylcaprolactam)	TPMCL	0.14
(等规)聚(1-十四烯)	poly(1-tetradecene), isotactic	PTD	0.14
3-氟苯乙烯	poly(3-fluorostyrene)	SPTFS	0.14
聚二乙炔二酯	poly(diacetylene diester)	DPDAS	0.14
聚丙烯酸酯	polyethyl acrylate	PEA	0.14

3 讨论

3.1 辽河流域土壤微(中)塑料的污染水平及主要影响因素

表 2 为当前国内不同区域土壤中微塑料的丰度及粒径。从中可知,不同研究区域农田土壤中微塑料的丰度存在较大差异。武汉郊区蔬菜地土壤微塑料的丰度为 320 ~ 12 560 n·kg⁻¹^[28],云南柴河流域蔬菜地土壤微塑料丰度为 18 760 n·kg⁻¹^[29],黄海桑沟湾楮岛农田土壤微塑料丰度为 17.1 n·kg⁻¹^[30],上海农田土壤微塑料丰度为 (62.50 ± 12.97) ~

(78.00 ± 12.91) n·kg⁻¹^[24],陕西农田土壤微塑料丰度范围为 1 340 ~ 3 140 n·kg⁻¹^[31],杭州湾沿岸平原农田土壤微塑料丰度为 263 ~ 571 n·kg⁻¹^[32],德国东南部农田土壤微塑料的丰度为 (0.34 ± 0.36) n·kg⁻¹^[33]。与以上研究相比,本研究中蔬菜地和玉米地土壤微(中)塑料的平均丰度值分别为 (100 ± 34.64) n·kg⁻¹和 (141.21 ± 160.7) n·kg⁻¹,低于武汉蔬菜地、云南蔬菜地土壤、陕西农田土壤及杭州湾沿岸平原农田土壤微塑料丰度^[28,29,31,32],高于上海、黄桑沟湾楮岛及德国东南部的农田土壤微塑料丰度^[24,30,33]。

表 2 不同国家和地区土壤中微(中)塑料的污染特征

Table 2 Distribution of micro(meso)plastic pollution in soils of different countries/regions

国家/地区	采样点	土壤类型	丰度/n·kg ⁻¹	粒径/mm	文献
中国	渤海和黄海	沿岸土壤	50 ~ 1 000	<1	[12]
上海	农田	稻-鱼共养体系	10.3 ± 2.2	<1	[21]
上海	郊区	农田土壤	62.50 ± 12.97 ~ 78.00 ± 12.91	<1	[24]
武汉	郊区	蔬菜地土壤	320 ~ 12 560	<0.2	[28]
云南	柴河流域	蔬菜地	18 760	0.05 ~ 1	[29]
浙江	桑沟湾楮岛	农田土壤	17.1	<5	[30]
陕西	山区、黄土高原和关中平原	农田土壤	1 340 ~ 3 140	0 ~ 0.49	[31]
杭州湾	沿岸平原	农田土壤	263 ~ 571	1 ~ 3	[32]
武汉	郊区	林地、菜地和空地	2.2 × 10 ⁴ ~ 6.9 × 10 ⁵	0.01 ~ 0.1	[37]
山东	滨海	潮滩土壤	634	<1	[38]
德国	东南部	农田土壤	0.34 ± 0.36	<5	[33]

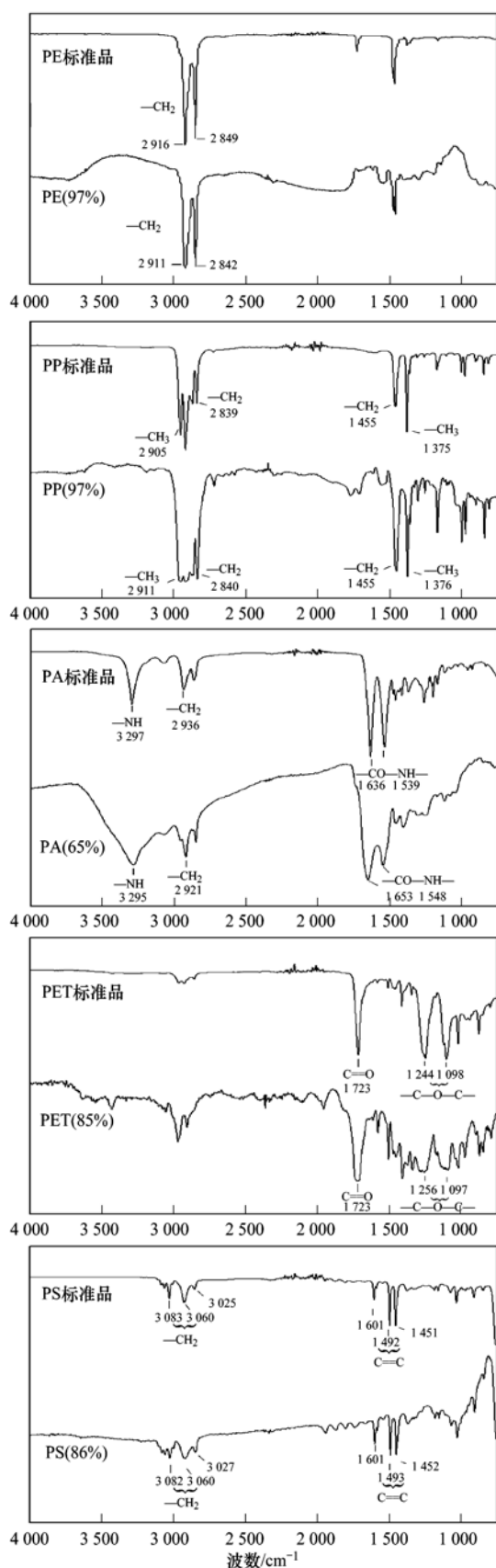


图8 典型微(中)塑料的红外光谱

Fig. 8 Infrared spectra of typical micro(meso)plastics

不同采样点微(中)塑料的丰度存在显著性差异, 采样点 L27 处的土壤微(中)塑料丰度最高 $[(886.67 \pm 133.17) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$, 其次是取自沈阳市新

民市养息牧河的站点 L21 $[(520.00 \pm 40.00) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$. 该两点周围村落密集, 附近有学校、化肥厂、饲料厂、煤场、水泥厂、客运站、商店、物流及餐饮配送公司等. 上述工业活动、旅游活动、密集的人口及农业活动中用到的塑料薄膜、泡沫和其他塑料制品等均可能极大地提高土壤中微(中)塑料的丰度^[24]. 其余微(中)塑料丰度较高的站点如 L14 ~ L16、L18、L19、L22 和 L26 附近环境与上述微(中)塑料丰度最高的采样点 L27 和 L21 类似, 也分布有较多的污染工业. 此外, 衣物洗涤产生的污水的直接排放及灌溉、地表径流、堆肥^[24] 及大气沉降也可导致环境中的微塑料积累^[34,35]. 以上表明, 本研究区域土壤微(中)塑料污染与人类活动密切相关. 另外, 荒地土壤中微(中)塑料的丰度高于其他土壤类型, 其可能因河流中的微(中)塑料随着涨潮或在洪水降雨等强水动力条件下, 将沉积在底泥及漂浮在河面上的微(中)塑料滞留在河岸上.

3.2 辽河流域土壤微(中)塑料的形貌、组成及潜在来源

已有不少研究表明小尺寸微塑料在环境中分布更广泛^[36]. 辽河流域土壤微(中)塑料的粒径越小, 其所占比例越高. 目前, 大多数研究表明土壤中微(中)塑料以 $<1 \text{ mm}$ 粒径为主^[12,28,37,38]. 塑料废弃物在物理磨损或生物降解的作用下, 可能会产生非常小的微塑料(甚至纳米塑料)^[39], 这些微塑料为一些污染物(有机污染物、重金属和人类病原体)的积累和转移提供了很好的载体, 也会对土壤结构产生影响, 进而改变土壤理化性质^[24].

辽河流域玉米地土壤中微(中)塑料的形状以碎片为主, 蔬菜地土壤则以纤维和薄膜为主. 国内外已有的农田土壤微塑料的研究结果也存在差异. 如: 云南柴河流域蔬菜地土壤^[29]、上海蔬菜地农田土壤^[24]、滇池湖滨区域不同土地利用类型的设施农田和缓冲带表层土壤^[40] 及陕西农田土壤^[36] 中微塑料的主要形状均以纤维状为主; 武汉郊区土壤及杭州湾沿岸平原农田土壤以碎片和纤维为主^[28,32], 德国东南部的农业农田土壤中微塑料形状则以薄膜和碎片状为主^[33]. 原因可能是土壤中的薄膜微塑料主要来源于大块残留农膜的降解和风化^[41], 且随着时间的推移, 薄膜状微塑料逐渐进一步降解为纤维类微塑料^[5]. 此外, 纤维状微塑料还可来源于人类日常生产、生活中的洗涤废水和工业废水的排放等.

辽河流域土壤微(中)塑料颜色以白色占比最高, 除林地和芦苇地土壤微(中)塑料颜色分别以黄色和黑色为主外, 其余 5 种土壤微(中)塑料颜色均以白色为主, 这可能与塑料覆盖膜的使用和大规模

覆膜种植导致的农膜残留有关.在实地调查时发现,辽河沿岸居民家中常用白色或半透明的塑料拱膜覆盖其院落.这些拱膜在强光、强风及降雨的作用下,会老化破碎,变成塑料垃圾.同样,覆膜种植产生的农膜也会残留在土壤表层,经风化降解为微塑料.因此,塑料拱膜的广泛使用及大规模覆膜种植导致的农膜残留是导致本研究区域土壤中白色微(中)塑料含量较高的主要原因.

辽河流域土壤中检出的微(中)塑料以 PP、PE 和 RY 为主,共占有微(中)塑料的 76.71%.蔬菜地土壤中 PE 微粒比例高达 40.00%,而草地、灌木地和芦苇地土壤 Rayon 的比例较高,玉米地和荒地中 PP 的比例较高.综合微(中)塑料的形状和成分可知,表层土壤微(中)塑料 RY 纤维、PP 碎片、PP 颗粒、PE 薄膜及 PS 泡沫最为常见,这与已有报道的结果一致^[19,42].据调查,土壤中的微(中)塑料薄膜主要来源于地膜以及肥料、农药、种子和饲料等产品的包装袋^[43],因为这些膜状塑料最常用的聚合物是 PE,包括高密度、低密度和线性低密度聚乙烯^[35].这些农业生产中使用的塑料制品会风化破碎成碎片类微(中)塑料,并逐渐在土壤环境中积累.这可能是蔬菜地土壤中 PE 类微(中)塑料丰度较高的主要原因.PP 碎片主要来源于丢弃的饮料瓶、一次性饭盒、食品包装盒、水杯和汽车零件.泡沫 PS 广泛应用于化妆品包装、日用装饰、制造行业及水产养殖行业中.在实地勘察中,随处可见漂浮在河面的泡沫浮标及残留在陆地的用于承装海鲜和包装的泡沫箱和泡沫板.辽河流域蔬菜地、草地、灌木地及芦苇地的 Rayon 很可能是废水灌溉和污泥施用造成的,因为 Rayon 被广泛应用于服装、室内装饰和医药产品及卫生用品等.

通过微(中)塑料的形貌特征以及采样点周边环境现状的综合考虑,初步明确了辽河流域土壤中微(中)塑料的主要来源:①薄膜状微(中)塑料主要来自塑料拱膜、农膜及各种包装袋^[42];②碎片状微塑料则如一次性生活塑料制品、塑料农药瓶等^[36];③纤维状微(中)塑料的来源主要包括生活污水的排放、农业灌溉以及渔业活动等^[35];④泡沫微(中)塑料主要来源于日用装饰、化妆品包装、制造行业及水产养殖中的泡沫浮标等.

4 结论

(1)辽河流域不同土壤采样点微(中)塑料的丰度存在显著性差异,平均丰度为 $(145.83 \pm 211.46) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$.丰度范围在 $(13.33 \pm 11.55) \sim (886.67 \pm 133.17) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间.其中,采样点 L27 的微(中)塑

料丰度最高 $[(886.67 \pm 133.17) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$,该点位于鞍山市台安县,丰度最低的采样点是 L12 $[(13.33 \pm 11.55) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$.

(2)不同类型土壤中微(中)塑料的丰度存在显著差异,其中荒地微(中)塑料丰度显著高于其他 6 种土壤类型.农业活动(地膜覆盖、污水灌溉和污泥堆肥)、密集的村落、塑料厂、服装厂和快递公司等是辽河流域土壤某些点位微(中)塑料丰度较高的主要原因.

(3)表层土壤中微(中)塑料以碎片类(46.00%)、 $<1000 \mu\text{m}$ (39.57%)、PP(41.71%)和白色(46.86%)为主.其中,Rayon、PES 和 PET 微(中)塑料以纤维状为主($>85\%$),PP 以碎片(85.62%)为主,PS 以泡沫为主,PE 以薄膜和碎片为主(96.91%).

(4)塑料制品(食品包装袋、塑料农膜、饮料瓶)、衣物洗涤废水和用于装饰和包装的泡沫材料等是辽河流域土壤微(中)塑料的主要潜在来源.

参考文献:

- [1] 杨婧婧,徐笠,陆安祥,等.环境中微(纳米)塑料的来源及毒理学研究进展[J].环境化学,2018,37(3):383-396.
Yang J J, Xu L, Lu A X, et al. Research progress on the sources and toxicology of micro (nano) plastics in environment [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(3): 383-396.
- [2] Avio C G, Gorb S, Milan M, et al. Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels[J]. Environmental Pollution, 2015, 198: 211-222.
- [3] Mu J L, Qu L, Jin F, et al. Abundance and distribution of microplastics in the surface sediments from the northern Bering and Chukchi Seas [J]. Environmental Pollution, 2019, 245: 122-130.
- [4] 薛向东,王星源,梅雨晨,等.微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为[J].环境科学,2020,41(8):3675-3683.
Xue X D, Wang X Y, Mei Y C, et al. Sorption behaviors of copper ions and tetracycline on microplastics in aqueous solution [J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3675-3683.
- [5] 赵昕,陈浩,贾其隆,等.城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为[J].环境科学,2020,41(8):3612-3620.
Zhao X, Chen H, Jia Q L, et al. Pollution status and pollution behavior of microplastic in surface water and sediment of urban rivers [J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3612-3620.
- [6] 贾其隆,陈浩,赵昕,等.大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除[J].环境科学,2019,40(9):4105-4112.
Jia Q L, Chen H, Zhao X, et al. Removal of microplastics by different treatment processes in shanghai large municipal wastewater treatment plants [J]. Environmental Science, 2019, 40(9): 4105-4112.
- [7] Zhou Q, Zhang H B, Fu C C, et al. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. Geoderma, 2018, 322: 201-208.
- [8] Zhao J M, Ran W, Teng J, et al. Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 640-641: 637-645.
- [9] Zhang W W, Zhang S F, Wang J Y, et al. Microplastic pollution

- in the surface waters of the Bohai Sea, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 541-548.
- [10] Rachman C M. Microplastics research-from sink to source[J]. *Science*, 2018, **360**(6384): 28-29.
- [11] Yu X B, Peng J P, Wang J D, *et al.* Occurrence of microplastics in the beach sand of the Chinese inner sea: the Bohai Sea[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 722-730.
- [12] 刘森, 陈颖, 王中博. 辽河保护区一级支流污染特征分析[J]. *环境保护与循环经济*, 2015, **35**(7): 46-51.
- [13] 可欣, 包清华, 黄晓妍, 等. 辽河保护区表层沉积物风险污染物清单筛选研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(8): 3107-3113.
- Ke X, Bao Q H, Huang X Y, *et al.* Screening of risk pollutants in surface sediment of Liaohe river protected areas[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(8): 3107-3113.
- [14] 姚杰. 辽河保护区水质调研及湿地工程植物根际微生物群落特征研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2014.
- Yao J. Research on water quality of Liaohe protected area and microbial community characteristics of rhizosphere in wetland project[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2014.
- [15] Nizzetto L, Futter M, Langaas S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(20): 10777-10779.
- [16] Horton A A, Walton A, Spurgeon D J, *et al.* Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 127-141.
- [17] 邵姗姗, 李艳红, 惠婷婷, 等. “十二五”期间辽河流域的典型流域土地利用组成和变化分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2017, **42**(1): 29-32.
- Tai S S, Li Y H, Hui T T, *et al.* Analysis and study of land use composition and change in Liaohe River Basin during the 12th Five-Year Plan Period [J]. *Environmental Science and Management*, 2017, **42**(1): 29-32.
- [18] 刘强. 辽河干流河岸带沉积物重金属污染特征研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2013.
- Liu Q. Study on characteristics of heavy metals pollution in sediments of the riparian along the Liaohe River[D]. Shenyang: Liaoning University, 2013.
- [19] Peng G Y, Xu P, Zhu B S, *et al.* Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China; a case study of risk assessment in mega-cities[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **234**: 448-456.
- [20] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al.* Lost at sea; where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, **304**(5672): 838.
- [21] Lv W W, Zhou W Z, Lu S B, *et al.* Microplastic pollution in rice-fish co-culture system: A report of three farmland stations in Shanghai, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, **652**: 1209-1218.
- [22] Nuelle M T, Dekiff J H, Remy D, *et al.* A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **184**: 161-169.
- [23] 韩丽花, 李巧玲, 徐笠, 等. 大辽河流域土壤中微塑料的丰度与分布研究[J]. *生态毒理学报*, 2020, **15**(1): 174-185.
- Han L H, Li Q L, Xu L, *et al.* Abundance and distribution of microplastics of soils in Daliao river basin[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, **15**(1): 174-185.
- [24] Liu M T, Lu S B, Song Y, *et al.* Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 855-862.
- [25] Hernandez E, Nowack B, Mitrano D M. Polyester textiles as a source of microplastics from households: a mechanistic study to understand microfiber release during washing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(12): 7036-7046.
- [26] Free C M, Jensen O P, Mason S A, *et al.* High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **85**(1): 156-163.
- [27] Sruthy S, Ramasamy E V. Microplastic pollution in Vembanad Lake, Kerala, India: The first report of microplastics in lake and estuarine sediments in India [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **222**: 315-322.
- [28] Chen Y L, Leng Y F, Liu X N, *et al.* Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: org/10.1016/j.envpol.2019.113449.
- [29] Zhang G S, Liu Y F, The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 12-20.
- [30] 熊宽旭. 黄海桑沟湾微塑料污染特征及其影响因素研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2019.
- Xiong K X. The study on pollution characteristics and influencing factors of microplastics in Sanggou bay, Yellow sea [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019.
- [31] Ding L, Zhang S Y, Wang X Y, *et al.* The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **720**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137525.
- [32] Zhou B Y, Wang J Q, Zhang H B, *et al.* Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: Multiple sources other than plastic mulching film[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121814.
- [33] Piehl S, Leibner A, Löder M G J, *et al.* Identification and quantification of macro-and microplastics on an agricultural farmland[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**, doi: 10.1038/s41598-018-36172-y.
- [34] Rodrigues M O, Gonçalves A M M, Gonçalves F J M, *et al.* Effectiveness of a methodology of microplastics isolation for environmental monitoring in freshwater systems[J]. *Ecological Indicators*, 2018, **89**: 488-495.
- [35] Bläsing M, Amelung W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 422-435.
- [36] Nor N H M, Obbard J P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **79**(1-2): 278-283.
- [37] Zhou Y F, Liu X N, Wang J. Characterization of microplastics and the association of heavy metals with microplastics in suburban soil of central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133798.
- [38] 周倩, 章海波, 周阳, 等. 滨海滩涂土壤中微塑料的分离及其表面微观特征[J]. *科学通报*, 2016, **61**(14): 1604-1611.
- Zhou Q, Zhang H B, Zhou Y, *et al.* Separation of microplastics from a coastal soil and their surface microscopic features[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, **61**(14): 1604-1611.
- [39] Hurley R R, Nizzetto L. Fate and occurrence of micro(nano) plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, **1**: 6-11.
- [40] 刘亚菲. 滇池湖滨农田土壤中微塑料数量及分布研究[D].

- 昆明: 云南大学, 2018.
- Liu Y F. Quantity and distribution of microplastics in farmland soil of lake shore in Dianchi lake [D]. Kunming: Yunnan University, 2018.
- [41] Guerranti C, Martellini T, Perra G, *et al.* Microplastics in cosmetics: Environmental issues and needs for global bans [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2019, **68**: 75-79.
- [42] Xiong X, Zhang K, Chen X C, *et al.* Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake-Qinghai Lake [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **235**: 899-906.
- [43] Andrady A L. Microplastics in the marine environment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(8): 1596-1605.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1,1.1,1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjks@rcees.ac.cn;网址:www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)